

Penerapan PID *Predictive Air-Ratio Controller* Pada Mesin Mobil Mitsubishi Tipe 4G63 Untuk Meminimumkan Emisi Gas Buang

Hendre Angga Prasetya dan Rusdhianto Effendi A. K

Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111

E-mail: ditto@elect-eng.its.ac.id

Abstrak—Seiring dengan adanya perkembangan sistem otomasi dalam dunia otomotif saat ini, dituntut untuk menghasilkan mesin dengan kadar emisi gas buang yang berada diambang batas kewajaran dan hemat bahan bakar sehingga diperlukan suatu sistem terhadap berbagai macam variabel yang mempengaruhi performansi mesin. Untuk menjaga supaya pemakaian bahan bakar pada kondisi optimal dapat diperoleh dengan cara mengatur waktu injeksi bahan bakar. Sistem waktu injeksi bahan bakar ini dipengaruhi oleh kecepatan mesin dan tekanan pada *intake manifold*. Dengan adanya pengaturan terhadap waktu injeksi bahan bakar akan meningkatkan efektifitas pembakaran yang secara tidak langsung juga mengurangi kadar emisi pada gas buang pada saat kondisi kecepatan stasioner. Pada tugas akhir ini, akan dilakukan penelitian tentang pengaruh waktu pengapian dan waktu injeksi yang diterapkan pada sistem pengaturan injeksi bahan bakar yang diaplikasikan pada mesin Mitsubishi 4G63 untuk mengatur waktu injeksi bahan bakar dan waktu pengapian pada saat mesin dalam kecepatan stasioner. Penelitian ini diujikan pada mesin Mitsubishi 4G63 empat silinder sebagai *plant* dengan kondisi kecepatan stasioner. Penerapan PID *Predictive Air-Ratio Controller* memberikan waktu injeksi yang tepat pada saat kecepatan stasioner sehingga dapat memaksimalkan perbandingan rasio udara sebesar 14,7 : 1 standar performansi mesin.

Kata Kunci—Penerapan PID *Predictive Air-Ratio Controller*, waktu injeksi, rasio udara

I. PENDAHULUAN

Mesin-mesin otomotif saat ini dituntut untuk menghasilkan performa yang tinggi dengan konsumsi bahan bakar yang rendah serta menghasilkan nilai emisi yang rendah. Untuk menghasilkan mesin dengan kadar emisi yang rendah dengan performa yang baik dapat diperoleh dengan cara mengatur waktu injeksi bahan bakar. Pengaturan waktu injeksi bahan bakar diperoleh berdasarkan besarnya nilai tekanan dalam *manifold* dan kecepatan putaran mesin, sedangkan waktu pengapian diperoleh berdasarkan posisi piston dan sudut *crank*. Keempat variabel tersebut kemudian diolah oleh metode kontrol yang digunakan oleh operator. Dengan adanya kontrol yang baik terhadap waktu injeksi bahan bakar akan diperoleh efektifitas pembakaran yang baik sehingga secara tidak langsung juga mengurangi kadar emisi [1].

Pada sebuah mesin yang memiliki ECU (*Engine Control Unit*), sebuah komponen elektronika di dalam mobil yang berfungsi untuk mengatur frekuensi dan lebar pulsa pada *fuel injector* dan waktu pengapian, dapat mengatur banyak atau tidaknya bahan bakar yang diinjeksikan sesuai dengan waktu injeksi yang diberikan oleh ECU serta waktu pengapian yang tepat [1]. Jika waktu injeksi yang diberikan terlalu lama maka dapat menyebabkan peningkatan emisi gas buang dan penggunaan bahan bakar pada mesin menjadi boros. Jika waktu injeksi yang diberikan terlalu pendek maka injeksi bahan bakar yang diberikan terlalu sedikit sehingga dapat membakar *valve-valve* pada ruang pembakaran. Jika waktu pengapian yang diberikan tidak tepat maka dapat terjadi detonasi. Oleh karena itu, agar diperoleh lama waktu injeksi dan waktu pengapian yang tepat maka digunakan metode-metode yang dapat memberikan aksi kontrol berupa pulsa lama waktu injeksi dan waktu pengapian yang sesuai dengan kebutuhan sistem pembakaran [2].

Penggunaan metode kontrol PID *Predictive Air Ratio Controller* pada percobaan ini ditujukan untuk mengatur waktu injeksi dan waktu pengapian agar lebih tepat pada waktunya sehingga diharapkan mampu mengurangi kadar emisi gas buang dan mengoptimalkan konsumsi bahan bakar [9]. Dalam menyelesaikan tentang penelitian menggunakan urutan metode yang meliputi pembelajaran tentang *plant* yang kemudian dilakukan pendekatan baik secara fisis maupun analitik sehingga didapatkan model *plant* yang berbentuk model matematik. Setelah didesain kontroler PID *Predictive air-ratio controller*. Pada akhirnya dilakukan simulasi dan implementasi.

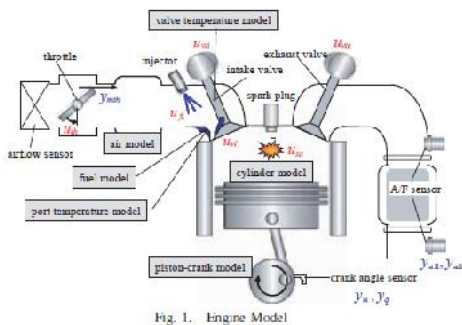
Pada saat mesin bekerja waktu injeksi bahan bakar dan waktu pengapian dapat berubah-ubah sesuai dengan kondisi perubahan mesin. Pengkondisian lama waktu injeksi dan waktu pengapian disesuaikan dengan masukan sensor tekanan dalam *manifold* yaitu sensor MAP (*Manifold Absolute Pressure*), sensor CAS (*Crank Angle Sensor*), TDC (*Top Dead Center*) dan Sensor Lamda. Ketidaktepatan lama waktu injeksi dan waktu pengapian akan menyebabkan terjadinya ketidaksesuaian standar rasio udara dan dapat menyebabkan terjadinya emisi gas buang yang tidak teratur serta dapat menurunkan kinerja mesin.

Ketepatan waktu injeksi sesuai dengan kondisi yang diberikan oleh sensor CAS juga diperhitungkan agar tidak terjadi keterlambatan atau percepatan waktu injeksi yang dapat

menyebabkan munculnya permasalahan berupa detonasi. Sistem pengaturan waktu injeksi dan waktu pengapian yang digunakan dalam penelitian ini adalah sistem kontrol dengan konfigurasi *direct digital control* berbasis mikrokontroler.

II. DASAR TEORI

A. Prinsip Kerja Mesin Bakar



Gambar 2.1 Model Engine Spark Ignition

Sistem injeksi pada Gambar 1 terdiri atas empat komponen utama yaitu injektor, busi, pipaintake manifold, ruang pembakaran dan air flow meter. Injektor berfungsi sebagai penyemprot bahan bakar yang diaktifkan oleh sinyal ECU. Pipa intake manifold berfungsi sebagai penyalur udara dan tempat untuk pengkabutan yaitu proses pencampuran antara udara dengan bahan bakar. Ruang pembakaran berfungsi sebagai tempat terjadinya proses pembakaran bahan bakar yang telah dikabutkan. Air flow meter adalah sensor aliran udara yang berfungsi sebagai pengukur laju udara (dapat juga menggunakan sensor MAP) dimana sensor ini beserta sensor kecepatan putaran mesin digunakan sebagai penentu lama waktu injeksi [2].

B. Mitsubishi Eterna (4G63) DOHC [6]

Plant mesin pengapian busi dengan merek dagang Mitsubishi Eterna dengan spesifikasi sebagai berikut.

Model number	: 4G63
Tipe	: In-line OHV, DOHC
Banyaknya silinder	: 4
Displacement	: 1,997 lt (121.9)
Cylinder Bore (mm)	: 85 (3.35)
Piston stroke (mm)	: 88 (3.46)
Compression ratio	: 7.8 or 9.0



Gambar 2.2 Mesin Mitsubishi Eterna 4G63

Plant digunakan sistem injeksi secara sekuensial yaitu sistem injeksi yang secara bergantian memberikan bahan bakar bersama-sama pada waktu yang sama pada semua silinder. Sistem pengapian yang digunakan pada *plant* ini yaitu sistem pengapian secara *grouping* yang secara kelompok silinder tertentu diberikan percikan bunga api bersama-sama.

C. Sistem Injeksi Bahan Bakar Motor Bensin [1]

Sejak Robert Bosch berhasil membuat pompa injeksi Diesel putaran tinggi (1922-1927), maka dimulailah percobaan-percobaan untuk memakai pompa injeksi tersebut pada motor bensin. Pada mulanya pompa injeksi motor bensin dicoba, bensin langsung disemprotkan ke ruang bakar sama halnya perlakuan pada motor diesel. Kesulitan yang muncul adalah ketika mesin dalam kondisi dingin, karena bahan bakar tidak tercampur udara dengan baik akibat dari temperatur udara yang rendah. Bensin yang tidak menguap tadi akan bercampur dengan oli, hal ini tidak akan terjadi lagi jika kondisi mesin sudah memanas.

Untuk mengatasi ini, penyemprotan secara langsung pada ruang bakar kemudian diganti dengan penyemprotan pada inlet manifold sehingga proses pengkabutan lebih merata dan terhindar dari bercampurnya oli dengan bahan bakar.

Para ahli konstruksi mesin mobil mulai memikirkan untuk membuat sistem injeksi yang berbeda dari kondisi-kondisi yang terdahulu. Prinsip kerja system injeksi yang sudah ada pada mobil-mobil saat ini dimulai pada tahun 1960-an dan pada tahun 1967 perusahaan mobil VW mengenalkan sistem injeksi D-Jetronik dimana sistem ini menggunakan kontrol elektronika. Sampai saat ini sistem injeksi K-Jetronik, L-Jetronik serta Mono-Jetronik telah banyak digunakan pada mobil-mobil saat ini.

Tabel 2.1 Perbandingan sistem injeksi bahan bakar

Sistem Injeksi Bahan Bakar		
Mekanik (Injeksi K)	Mekanik Elektronik (Injeksi EF)	Elektronik (EFI) (L-Jetronik)
Injektor membuka terus pada tekanan tertentu	Injeksi K yang menggunakan kontrol elektronika	Injektor membuka secara elektromagnetik yang diatur oleh unit pengontrol elektronik

Pada kondisi beroperasi, *spark-ignition engine* membutuhkan campuran antara bahan bakar dan udara yang direpresentasikan dengan rasio perbandingan jumlah bahan bakar dengan udara yang tercampur (*Air to Fuel Ratio/ AFR*). Perbandingan ideal dari udara dan bahan bakar untuk satu kali proses pembakaran adalah 14,7:1 yang berarti bahan bakar sebanyak 1 g berbanding dengan udara sebanyak 14,7 g dan disebut sebagai AFR stokiometrik.

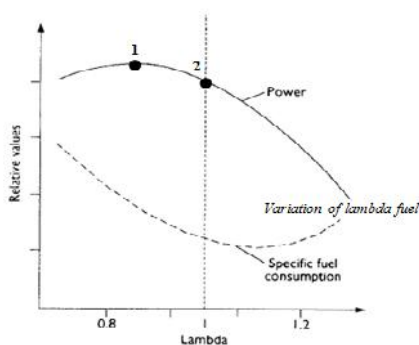
Nilai AFR yang ideal menggambarkan titik keseimbangan terbaik antara daya mesin dengan bahan bakar yang dikeluarkan. Nilai AFR yang lebih besar dari 14,7 : 1 disebut campuran miskin, yang berarti udara lebih banyak daripada kondisi ideal, sehingga daya mesin berkurang dan bahan bakar lebih irit. Nilai AFR yang lebih kecil dari 14,7 : 1 disebut campuran kaya, yang berarti

bahan bakar lebih banyak dikeluarkan, namun daya mesin meningkat. AFR kondisi aktual yang terjadi di ruang pembakaran dibagi dengan AFR stokiometrik diperoleh harga AFR relatif yang disebut *Lambda* ().

Secara umum terdapat empat macam nilai *lambda* yang dihasilkan pada proses pembakaran *spark ignition engine*, yaitu :

- $= 1$: massa udara yang dicampurkan pada bahan bakar sesuai dengan teori
- < 1 : kondisi dimana massa udara yang dicampurkan dengan bahan bakar lebih sedikit dibandingkan kondisi stokiometri, atau yang biasa disebut campuran kaya
- > 1 : kondisi dimana massa udara yang dicampurkan dengan bahan bakar lebih banyak dibandingkan kondisi stokiometri, atau yang biasa disebut campuran miskin.
- $> 1,5$: campuran bahan bakar dan udara tidak dapat dibakar dengan sempurna, kondisi ini dapat mengakibatkan mesin tersendat-sendat.

Ketika mesin di *starter* dan masih dalam kondisi dingin, jumlah bensin yang diinjeksikan ditambah karena komponen mesin yang masih dingin menyebabkan bensin mengembun. Ketika mesin dalam kondisi dingin, jumlah bensin yang diperlukan berbeda saat mesin sudah panas. Hal ini disebabkan karena adanya peluang bensin mengembun setelah dicampurkan dengan udara pada *intake manifold*, serta mesin saat masih dingin penyelesaian celah-celah pada komponen belum sebaik setelah temperatur kerja sehingga ada kebocoran kompresi yang lebih besar disamping faktor gesekan yang masih tinggi, sehingga campuran yang sesuai adalah campuran yang sedikit kaya yang menghasilkan daya yang besar. Gambar X. Menunjukkan pemetaan perbandingan nilai *lambda* terhadap daya kerja mesin dan konsumsi bahan bakar. Nilai *lambda* yang cocok untuk kondisi mesin dingin adalah pada titik 1 ($1 < < 1,1$), pada titik ini, suhu pembakaran meningkat drastis sehingga membuat mesin cepat mencapai suhu pembakaran ideal.



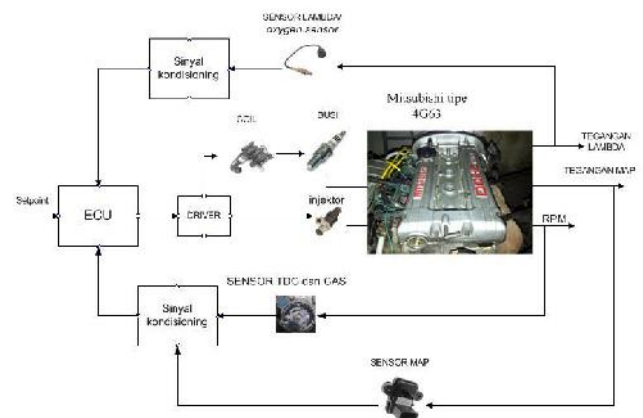
Gambar 2.3 Grafik perbandingan daya dan konsumsi bahan bakar [1]

Saat mesin sudah panas, nilai *lambda* yang cocok berdasarkan Gambar X. adalah pada saat $= 0,9$ karena daya kerja mesin mencapai titik tertinggi sehingga respon mesin untuk mencapai kecepatan stasioner lebih cepat. Saat mesin mencapai kecepatan stasioner, udara yang masuk lebih sedikit

dibandingkan saat *starting*, sehingga dipilih *lambda* yang dapat menghemat bahan bakar yaitu $= 1,15$.

III. PERANCANGAN KONTROLER

Arsitektur sistem pengaturan kecepatan stasioner pada mesin pengapian busi yang dibangun memiliki beberapa komponen yaitu *plant* berupa sistem injeksi mesin, perangkat keras untuk mengontrol mesin, dan perangkat lunak untuk monitoring dan pengambilan data mesin. Gambaran sistem yang dibangun secara keseluruhan seperti pada Gambar



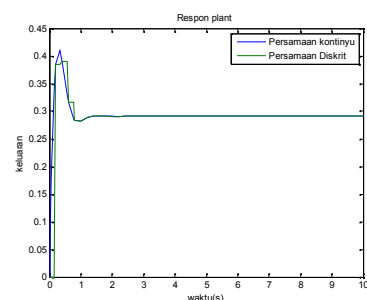
Gambar 3.1 Arsitektur sistem pengaturan kecepatan stasioner pada mesin pengapian busi

A. Identifikasi Sistem

Identifikasi sistem dilakukan pada saat *idle* dengan memberikan sinyal masukan secara bervariasi. Pada step ini, terdapat tiga variasi sinyal masukan yaitu lebar pulsa injeksi, titik mati pengapian, dan bukaan stepper. Sistem diposisikan menjadi sistem loop terbuka dan tanpa diberikan kontroler. Langkah percobaannya yaitu dengan memberikan konstan dua variasi sinyal masukan dan memberikan perubahan salah satu sinyal masukan. Respon keluaran dari sistem yang kemudian direkam datanya dan digunakan sebagai dasar dalam melakukan pemodelan sistem. Identifikasi sistem yang dilakukan untuk mencari parameter-parameter *plant engine*.

B. Pemodelan Sistem

Pada tahap adalah tahapan dilakukan pendekatan matematis dari hasil data identifikasi sehingga didapatkan persamaan plant dalam bentuk diskrit sebagaimana diperlihatkan pada Gambar



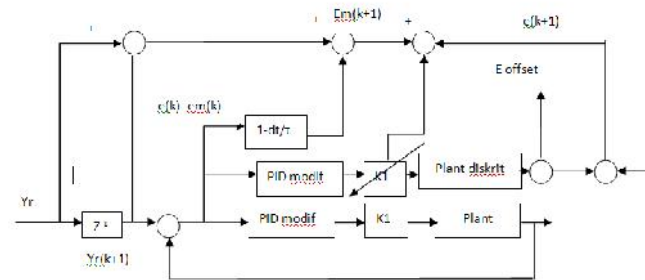
Gambar 3.2 Respon diskrit dan kontinyu Plant

Dari bentuk respon pada Gambar dihasilkan transfer function sebagai berikut:

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{6.721s + 25.42}{s^2 + 8.176s + 43.7} \quad (1)$$

C. Perancangan Kontroler

Terdapat dua hal dalam merancang kontroler PID Prediktif. Yaitu merancang model prediktif kontroler dan kontrol PID modifikasi



Gambar 3.3 Diagram Blok Kontroler PID Prediktif keseluruhan

Pada proses prediktif pada diagram blok di atas, transfer function yang diperoleh dari pemodelan sistem akan dirubah ke dalam bentuk diskrit.

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{6.721s + 25.42}{s^2 + 8.176s + 43.7}$$

diubah ke bentuk transformasi Z, dengan nilai $T_s=0.2$ maka,

$$\frac{Y(z)}{U(z)} = \frac{0.7696z^{-1} - 0.335z^{-2}}{1 - 0.4477z^{-1} + 0.1949z^{-2}}$$

$$Y(z) = 0.4477z^{-1}Y(z) - 0.1949z^{-2}Y(z) + 0.7696z^{-1}U(z) - 0.335z^{-2}U(z)$$

maka bentuk diskritnya ;

$$Y(k) = 0.4477Y(k-1) - 0.1949Y(k-2) + 0.7696U(k-1) - 0.335U(k-2)$$

model prediktif dari plant

$$Y(k+1) = 0.4477Y(k) - 0.1949Y(k-1) + 0.7696U(k) - 0.335U(k-1)$$

Pada proses prediktif, terdapat model referensi Y_{ref} yang merupakan keluaran yang diharapkan. Maka terdapat selisih $E_m(k)$ atau *error* model antara keluaran referensi Y_{ref} dan keluaran model diskrit dari plant $Y(k)$.

$$E(k) = Y_{ref} - Y(k) \quad (2)$$

$$E_m(k) = E(k) \quad (3)$$

karena respon yang diharapkan orde 1 maka

$$Y_m(s) = \frac{1}{s+1} x Y_{ref}(s) \quad (4)$$

$$E_m(s) = Y_{ref}(s) - Y_m(s) \quad (5)$$

$$E_m(s) = (1 - \frac{1}{s+1}) x Y_{ref} \quad (6)$$

$$E_m(s) = \frac{s}{s+1} x Y_{ref}(s) \quad (7)$$

$$s E_m(s) + E_m(s) = s Y_{ref}(s) \quad (8)$$

karena $Y_{ref} = \text{konstan}$, maka $\dot{Y} = 0$ maka;

$$\frac{s E_m(s) + E_m(s)}{\Delta t} + E_m(s) = 0 \quad (9)$$

$$\frac{s E_m(s) + E_m(s)}{\Delta t} = -E_m(s) \quad (10)$$

$$E_m(k+1) = -\frac{\Delta t}{s} E_m(k) + E_m(k) \quad (11)$$

$$E_m(k+1) = (1 - \frac{\Delta t}{s}) E_m(k) \quad (12)$$

untuk mencari selisih error yang diprediksi menggunakan rumus

$$E(k+1) = Y_{ref}(k) - Y(k+1) \quad (13)$$

jika $E(k+1) < E_m(k+1)$ maka $K1 = K1 + \Delta K1$ dan jika

$E(k+1) > E_m(k+1)$ maka $K1 = K1 - \Delta K1$

2) Perancangan kontroler PID modifikasi Diskrit

$$\frac{u(s)}{e(s)} = \frac{K_p r s^2 + s s + 1}{s^2 + s + 1} \quad (1)$$

$$s \frac{d}{dt} \left(\frac{\Delta u}{\Delta t} \right) + \frac{\Delta u}{\Delta t} = r K_p \frac{d}{dt} \frac{\Delta e}{\Delta t} + s K_p \frac{\Delta e}{\Delta t} + K_p e^{(2)}$$

$$s \frac{d}{dt} \left(\frac{u(k) - u(k-1)}{\Delta t} \right) + \frac{u(k) - u(k-1)}{\Delta t} = r K_p \frac{d}{dt} \left(\frac{e(k) - e(k-1)}{\Delta t} \right) + s K_p \left(\frac{e(k) - e(k-1)}{\Delta t} \right) + K_p e(k) \quad (3)$$

$$= r K_p \frac{d}{dt} \left(\frac{e(k) - e(k-1)}{\Delta t} \right) + s K_p \left(\frac{e(k) - e(k-1)}{\Delta t} \right) + K_p e(k)$$

$$s \frac{d}{dt} \left(\frac{\frac{u(k) - u(k-1)}{\Delta t} - \frac{u(k-1) - u(k-2)}{\Delta t}}{\Delta t} \right) + \frac{u(k) - u(k-1)}{\Delta t} = r K_p \frac{d}{dt} \left(\frac{\frac{e(k) - e(k-1)}{\Delta t} - \frac{e(k-1) - e(k-2)}{\Delta t}}{\Delta t} \right) + s K_p \left(\frac{e(k) - e(k-1)}{\Delta t} \right) + K_p e(k) \quad (4)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\ddot{u}(k) - \ddot{u}(k-1)}{\Delta t} - \frac{\ddot{u}(k-1) - \ddot{u}(k-2)}{\Delta t} \\ & = rKp \left(\frac{e(k) - e(k-1)}{\Delta t} - \frac{e(k-1) - e(k-2)}{\Delta t} \right) + sKp \left(\frac{e(k) - e(k-1)}{\Delta t} \right) + KPe(k) \quad (5) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \frac{\ddot{u}}{Ts^2} + \frac{\dot{u}}{Ts} = \\ & \frac{rKp}{Ts^2} + \frac{sKp}{Ts} e(k) - \left(\frac{2rKp}{Ts^2} + \frac{sKp}{Ts} \right) e(k-1) \\ & + KPe(k) + \left(\frac{2\ddot{u}}{Ts^2} + \frac{\dot{u}}{Ts} \right) u(k-1) + \\ & \frac{\ddot{u}}{Ts^2} u(k-2) \quad (6) \end{aligned}$$

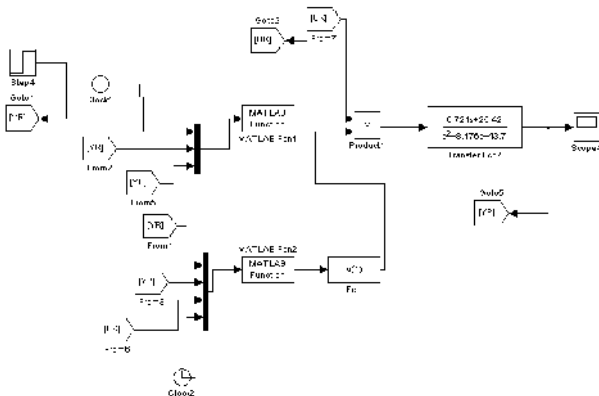
Sehingga menghasilkan persamaan PID modifikasi diskrit sebagai berikut

$$U(k) = 0.13e(k-1) + 0.088e(k-2) + 1.593u(k-1) - 0.5693u(k-2)$$

IV. SIMULASI DAN IMPLEMENTASI

A. Hasil Simulasi

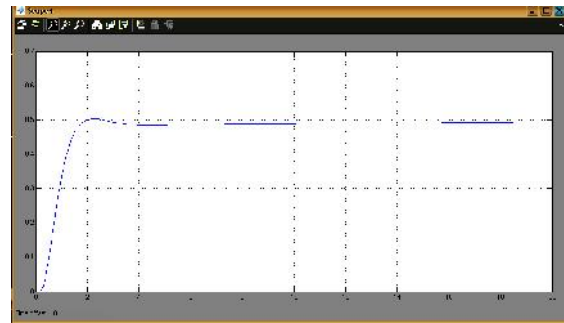
Simulasi sistem dilakukan dengan menggunakan model *engine* yang merepresentasikan *plant* nyata. Keluaran sensor lambda plant tersebut diatur dengan menggunakan kontroler PID prediktif seperti yang terlihat pada Gambar4.1



Gambar4.1 Tampilan Simulasi pada Matlab

Pada simulasi masih terjadi overshoot karena kontroler Prediktif memberikan referensi pengali pada kontroler PID sehingga terkadang menghasilkan gain pengali yang tidak tepat

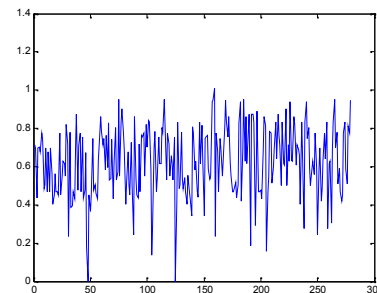
Berikut merupakan respon dari simulasi engine menggunakan kontroler PID Prediktif



Gambar4.2Keluaran Hasil Simulasi

B. Hasil Implementasi

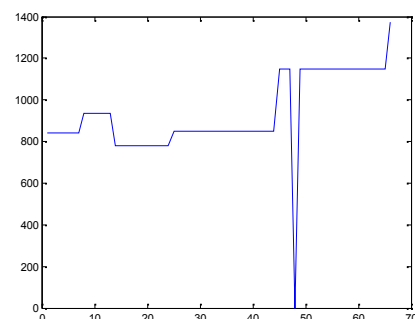
Implementasi dilakukan dengan gangguan dari bukaan motor stepper yang diputar secara manual. Pada pengujian ditampilkan respon dari sensor keluaran lambda. Berikut merupakan keluaran dari respon sensor lambda yang ditunjukkan Gambar4.3



Gambar4.3Respon Keluaran Sensor lambda

Pada gambar4.3 respon terlihat masih ada ripple memperlihatkan masih ada fluktuasi sehingga mengakibatkan timbulnya getaran mekanik tetapi respon sudah mendekati setpoint yang diinginkan yaitu 0.6 walaupun respon masih berada sekitar 0.45-0.78

Gambar 4.4 menunjukkan jika ada gangguan berupa variasi bukaan stepper terlihat pada gambar



Gambar4.4Respon Kecepatan Ketika Dirubah Bukaan Stepper

V. KESIMPULAN DAN PENUTUP

Pada penelitian menggunakan kontroler PID Prediktif respon masih terjadi ripple sehingga keluaran sistem dari lamda masih sekitar 0.45-0.78 karena adanya getaran mekanik.

Dalam penelitian ini masih banyak kekurangan diantaranya sistem ECU yang masih belum kompleks sehingga hubungan antara pengapian dan injeksi kurang baik diharapkan pada penelitian selanjutnya dibuat sistem yang lebih kompleks menggunakan sebuah mikro sebagai pusat kontrol.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis sampaikan terimakasih kepada keluarga saya yang tercinta yang senantiasa memberi dukungan materi dan moril, Tim ototronik "all star" yang terdiri dari sekumpulan orang hebat, supri, hady, ripley, luqman, agoeng, sandro, billy, indra sebagai tonggak awal penelitian dan tim sekarang, mbak indah, mas hairil dan puthut dan Saya sendiri, Bapak Rusdhianto Effendi sebagai pembimbing saya, serta semua dosen pengaturan yang semuanya pernah memberi saya bimbingan tambahan, Temen LJ SP angkatan 2010, Seluruh warga lab TSP, Seluruh teman teman, serta penerus tim ototronik berikutnya.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] *Fuel delivery and injection control*, Toyota Motor Sales, U.S.A, Inc. , (2003).
- [2] Windharto Arif S.W, "Perbaikan Kinerja Engine Toyota 5K 4 Silinder 1500CC pada Kondisi Percepatan Menggunakan Knowledge Base Kontrol", Tugas akhir Jurusan Teknik Elektro ITS (2005).
- [3] Miller. R.M., S.L. Shah, R.K. Wood and E.K. Kwok, *Predictive PID*, ISA Transaction, (1999), 38, 11–23.
- [4] Katebi, M.R. and M.H. Moradi, *Predictive PID Controllers*, *IEE Proc. Control Theory Application*, 148(6), (2001), 478–487.
- [5] Clarke. D.W., C. Mohtadi and P.S. Tuffs, *Generalized Predictive Control-Part I. The Basic Algorithm*, *Automatica*, 23(2), (1987), 137–148.
- [6] Bordons, C., and Camacho, E.F., *A Generalized Predictive Controller for a Wide Class of Industrial Processes*, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 6(3), (1998), 372–387.
- [7] P.P. Indra, "Sistem Pengaturan Injeksi Bahan Bakar Mesin Mitsubishi 4g63 Menggunakan Metode Fuzzy", Tugas akhir Jurusan Teknik Elektro ITS (2011),.
- [8] Hakim. L.M, "Perancangan dan Implementasi Kontroler PID untuk Pengaturan Waktu Injeksi dan Waktu Pengapian Saat Kecepatan Stasioner pada Spark Ignitation Engine", Tugas akhir Jurusan Teknik Elektro ITS (2011).
- [9] Santoso, Ari dkk. *Experimen Awal: Pengaruh Membership Function Untuk Fuzzy Logic Control Terhadap Sudut Pengapian pada Sistem Pembakaran SIE (Spark Ignition Engine)*.
- [10] *Instruction Modules (Electrical, Engine Performance 1&2)*. Toyota Motor Sales USA, Inc (2006).